

ДИСКРЕТНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ ДЫРОК В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, В.Г.Шенгуров

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского¹⁾

603600 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 13 апреля 1998 г.

Обращается внимание на то, что частичное окисление пористого кремния (ПК), сформированного на сильнолегированных кристаллах, в силу топологии пор может приводить к образованию анизотропного материала с гирляндами из гранул кремния диаметром в единицы нанометров, вкрапленных в диэлектрическую двуокись кремния SiO_2 . При таких размерах гранул существенны корреляционные эффекты в туннелировании электронов (дырок) из-за их кулоновского взаимодействия, что должно проявляться в их дискретном туннелировании при температурах, сравнимых с комнатной. Приводятся измеренные при комнатной температуре вольт-амперные характеристики диодных структур $n^+-\text{ПК}p^+ - p^+$ с прослойкой ПК на $p^+-\text{Si}$ со ступеньками тока на прямой и обратной ветвях, которые мы связываем с дискретным туннелированием дырок вдоль кремниевых гирлянд в SiO_2

PACS: 72.80.Ng

Наибольший интерес к пористому кремнию (ПК) вызван возможностью получения красно-желтой и даже голубой люминесценции, которую связывают с наноразмерными квантовыми ограничениями на зонные состояния электронов [1,2]. В случае формирования ПК на сильнолегированных кристаллах n - или p -типа пока непонятный удивительный механизм самоорганизации при анодном растворении кремния может приводить к образованию упорядоченной системы пор диаметром около 10 нм и, при пористости $\sim 50\%$, с почти таким же расстоянием между ними. Это можно видеть на фотографии электронно-микроскопического изображения бокового скола слоя ПК на $n^+-\text{Si}$ (КЭС-0.01) в [3]. Аналогическая картина наблюдалась потом на наших слоях ПК, образованных на кристаллах $p^+-\text{Si}$ (КДБ-0.01, КДБ-0.005). В настоящем сообщении мы обращаем внимание на то, что частичное окисление ПК в силу топологии пор может приводить к образованию анизотропного материала с гирляндами из гранул кремния диаметром в единицы нанометров, вкрапленных в диэлектрическую двуокись кремния SiO_2 . Из-за малой электрической емкости между гирляндами при температурах порядка комнатной должна проявляться кулоновская блокада туннелирования электронов или дырок вдоль гирлянд. Здесь мы приводим измеренные при комнатной температуре вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодных структур с прослойкой ПК, на которых наблюдались характерные для дискретного туннелирования ступеньки тока, а именно такой ПК может представлять практический интерес для одноэлектроники с предельной рабочей частотой, как показано К.К.Лихаревым [4], до 10^{13} Гц.

Поясним предполагаемый механизм образования гирлянд. За несколько часов простой выдержки на воздухе при комнатной температуре, как показывает опыт, на поверхности кремния образуется слой SiO_2 толщиной 2–3 нм. Если бы поры были

¹⁾ e-mail: ett@phys.unn.runnet.ru

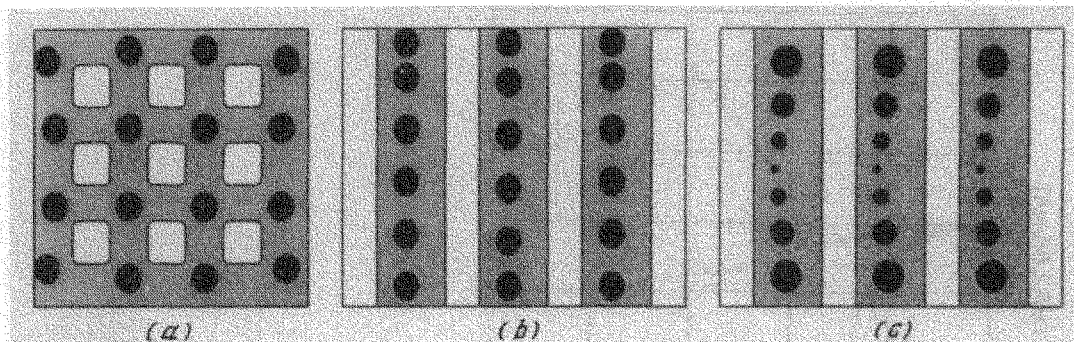


Рис.1. Схематическое изображение пористого кремния: а – вид "сверху", б – вид "сбоку" при однородных порах (гирлянды из одинаковых гранул), с – вид "сбоку" при неоднородных порах (гирлянды из гранул разного диаметра). Серый фон – SiO_2 , черные кружки – гранулы кремния

равномерны по сечению, образовались бы, очевидно, кремниевые нити диаметром около 5 нм, как схематически показано на рис.1а. Но поры, как следует из вышеупомянутых электронно-микроскопических изображений, модулированы по диаметру с шагом меньше или порядка этого диаметра. Кремниевая нить превращается в гирлянду из гранул кремния, диаметр каждой – порядка диаметра нити (см. рис.1б) или из-за сквозного окисления узких мест, или из-за разрыва узких мест механическими напряжениями на границе Si-SiO_2 и диффузионного заполнения разрывов двуокисью кремния. Оценка электрической емкости C между 5-нанометровыми гранулами с такой же толщиной диэлектрического барьера SiO_2 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4$ дает величину $1.5 \cdot 10^{19}$ Ф, что соответствует кулоновскому барьеру $e^2/2C = 0.5$ эВ. Это в 20 раз больше kT при $T = 290$ К и, согласно рис.1 в [4], должно приводить к заметной нелинейности ВАХ туннельного контакта при комнатной температуре. Кроме того, вероятна дальняя неоднородность нитей. На некотором расстоянии от поверхности ПК наиболее слабое место содержит несколько гранул наименьшего диаметра, как на рис.1с. Это может быть стимулировано изменением тока при анодировании кремния. И такое место будет в основном определять ВАХ гирлянды.

На рис.2 приведены ВАХ одной из диодных структуры n^+ -ПК p^+ - p^+ с поперечным диаметром 0.5 мм. Слой ПК толщиной 2–3 мкм формировался на p^+ -Si (КДБ-0.01) и выдерживался при комнатной температуре в течение суток на воздухе. Затем на нем эпитаксиально по технологии [5] выращивался слой n^+ -Si с удельным сопротивлением ~ 0.01 Ом·см. Подробнее детали технологии будут описаны в другом месте. Для сравнения на рис.2 приведена ВАХ такого же диода n^+ - p^+ , но без прослойки ПК. Она имеет обычный несимметричный вид с большими токами на обратной ветви из-за туннелирования носителей тока сквозь p – n -переход.

Все диоды с прослойкой ПК имели, как и должно быть, при тех же напряжениях меньшие, чем обычные диоды, токи в прямом и обратном направлениях. Среди них был большой разброс, видимо, из-за разной плотности ПК в разных местах поверхности кристалла. Наиболее ярко выраженные ступеньки тока были на наиболее высокоомных в прямом и обратном направлениях диодах, как на рис.2. Они лучше видны на обратной ветви ВАХ диодов, где процессы на осложнены инжекцией

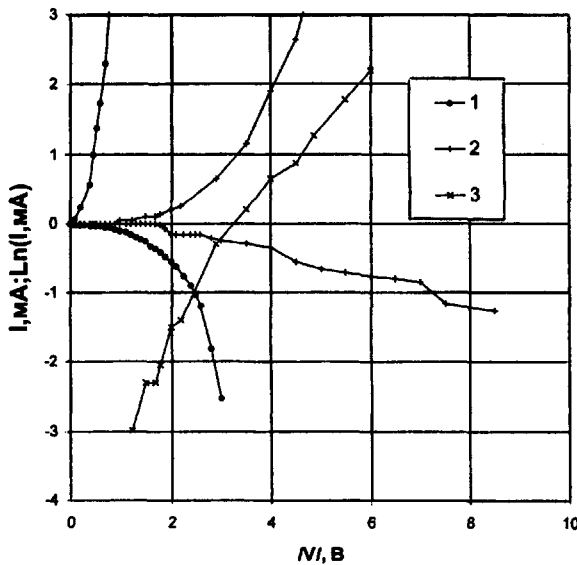


Рис.2. ВАХ диодов: ● - $n^+ - p^+$ -диоды, × - $n^+ - \text{ПК}^+ - p^+$ -диоды, + - прямая ветвь ВАХ в полулогарифмическом масштабе для $n^+ - \text{ПК}^+ - p^+$ -диода

электронов из n^+ -слоя. Эта ветвь, как видно из рис.2, в среднем близка к линейной зависимости, как и полагается для туннелирования электронов или дырок сквозь диэлектрические барьеры. Наблюдалось несколько ступенек тока высотой 150 мкА – 300 мкА каждая. Ступеньки тока не связаны с необратимыми изменениями в ПК, так как ВАХ были безгистерезисными. Первый скачок тока на обратной ветви около 2 В может означать, что в слабом месте каждой гирлянды, согласно вышеприведенным оценкам, туннелирование происходит сквозь гранулу диаметром ~ 1 нм или через 3–4 гранулы по 5 нм с кулоновским барьером e^2/C_Σ с последовательной емкостью C_Σ , а также из-за вероятного барьера около 2 эВ на границе слоя $n^+ - \text{Si}$ и слоя ПК. В пользу последнего свидетельствует то, что на прямой ветви ступеньки тока начинаются при меньших напряжениях. Интервалы между первыми ступеньками около 0.5 В, что согласуется с вышеприведенной оценкой кулоновской блокады для гранул диаметром 5 нм. Последующие ступеньки тока на прямой ветви ВАХ для диодов со слоем ПК располагаются приблизительно при тех же значениях напряжения, что и на обратной ветви. Это лучше видно на зависимости логарифма тока от напряжения на рис.2.

Пока трудно связать положение ступенек тока с особенностями туннелирования в частично окисленном ПК, который много сложнее, чем до сих пор количественно проанализированные системы с одной и двумя металлическими гранулами между металлическими "берегами" [4, 6], сложнее как по количеству взаимосвязанных проводящих гранул, так и из-за их полупроводниковой природы. Естественно ожидать как короткодействующую, так и далекодействующую связь между гирляндами за счет бокового (более слабого, чем продольный) туннельного обмена электронами между гранулами соседних гирлянд, бокового электрополевого взаимодействия и за счет обмена электромагнитными квантами с энергией $\nu = I_g/e$, где I_g – ток гирлянды. До конца не ясна роль легирования мелкими примесями, хотя несимметричный вид ВАХ диодов с ПК на рис.2 свидетельствует о том, что в наноразмерных гранулах кремния мелкая акцепторная примесь бора имеет достаточно малую энергию

ионизации, чтобы определять тип проводимости гранул. Сохранение электрической активности мелких примесей согласуется с наблюдавшимся в [7] влиянием типа примеси на ЭПР в ПК. Дырочной проводимости способствуют и известные акцепторные уровни границы Si-SiO₂, роль которых возрастает с измельчением гранул, а также полевое "легирование" за счет близости n^+ -области в наших диодах. Поэтому, а также в связи с несимметричностью ВАХ диодов со слоем ПК, мы предполагаем дискретное туннелирование. Ситуация здесь сложнее металлического варианта и из-за большой длины экранирования Дебая. Наконец, следует отметить, что хотя корреляционные эффекты кулоновского взаимодействия электронов или дырок "обгоняют" кванторазмерные изменения в электронном спектре, при размерах гранул в единицы нанометров и то и другое, вероятно, должно сказываться на ВАХ диодов с ПК. Во всяком случае, наличие хорошо выраженных ступенек тока свидетельствует не только о малой дисперсии в параметрах большого числа параллельно включенных туннельных контактов, но и о своеобразной самоорганизации в системе активных осцилляторов, подобно таковой в лазерах. Вероятно, последующие исследования при различных температурах и попытки обнаружения спектра излучения диодов с ПК позволят прояснить природу ступенек тока и возможности СВЧ генерации.

Авторы признательны С.А.Гусеву за отснятые электронно-микроскопические изображения наших образцов ПК в ИФМ РАН.

Работа выполнялась при поддержке МНТП "Материалы электронной техники" (грант 223-МП15).

-
1. П.К.Кашкаров, В.Ю.Тимошенко, Природа №12, 12 (1995).
 2. R.T.Collins, P.M.Fauchet, and M.A.Tischler, Phys. Today, January, 24 (1997).
 3. С.А.Гусев, Н.А.Короткова, Д.Б.Розентштейн и др., Письма в ЖЭТФ 20, 50 (1994).
 4. К.К.Лихарев, Микроэлектроника 16, 195 (1987).
 5. В.Г.Шенгуров, В.Н.Шабанов, Н.В.Гудкова, В.Я.Ткач, Микроэлектроника 22, 19 (1993).
 6. I.M.Ruzin, V.Chandrasekhar, E.I.Levin, and L.I.Glazman, Phys. Rev. B45, 13469 (1992).
 7. Е.С.Демидов, В.Г.Шенгуров, Н.Е.Демидова, В.Н.Шабанов, ФТП 28, 701 (1994); 28, 1503 (1994).